

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 990 247**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **03.05.2022 PCT/EP2022/061809**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.11.2022 WO22243023**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.05.2022 E 22727101 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.07.2024 EP 4314546**

54 Título: **Reducción de cargas sísmicas que actúan sobre una turbina eólica**

30 Prioridad:

18.05.2021 EP 21174331

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

29.11.2024

73 Titular/es:

**SIEMENS GAMESA RENEWABLE ENERGY A/S
(100.0%)**

**Borupvej 16
7330 Brande, DK**

72 Inventor/es:

**ALBERTS, JOHANNES GERHARDES WARDJAN;
NAVALKAR, SACHIN TEJWANT;
RAVASIO, MATTEO y
DE WINTER, CORNELIA**

74 Agente/Representante:

DEL VALLE VALIENTE, Sonia

ES 2 990 247 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Reducción de cargas sísmicas que actúan sobre una turbina eólica

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere al campo técnico de las turbinas eólicas. La presente invención se refiere en particular a una turbina eólica con un dispositivo de control de eventos sísmicos. La presente invención se refiere además a un método de reducción de una carga sísmica que actúa sobre una turbina eólica. Además, la presente invención se refiere a un uso específico del accionamiento del paso de una pala.

Antecedentes de la técnica

15 Puede considerarse una práctica común la instalación de turbinas eólicas dentro de un entorno especialmente ventoso, p. ej., en alta mar, para obtener una producción de energía eficiente. Sin embargo, algunos de estos entornos son regiones de alta actividad sísmica, por ejemplo, en la región Asia-Pacífico. Por lo tanto, es posible que la respuesta de una turbina eólica y su estructura de soporte a un evento sísmico, cuando existe cierta probabilidad de que se produzcan eventos sísmicos, tenga que evaluarse de forma que puedan determinarse las futuras cargas sísmicas.

20 Dependiendo de las normativas locales, es posible que sea necesario incluso probar que la estructura de una turbina eólica puede cumplir los siguientes criterios:

i) Criterio de ausencia de daños: esta condición requiere que las cargas sísmicas no superen el límite elástico del material de ningún componente que soporta cargas. En países tales como Japón, se espera que la turbina eólica mantenga la integridad estructural para eventos sísmicos de baja severidad.

ii) Criterio de no colapso: Esta condición permite que se exceda localmente el límite elástico del material en los componentes que soportan cargas. Sin embargo, esto requiere que no se supere la resistencia máxima de los materiales y que no se produzca ningún desprendimiento o fallo catastrófico de ningún componente que soporta cargas. En países como Japón, se espera que la turbina eólica cumpla el criterio de no colapso para eventos sísmicos extremadamente raros (período de retorno de 475 años), de severidad moderada a alta.

35 Para una turbina eólica en alta mar típica situada en la región Asia-Pacífico, incluyendo Japón, Corea y Taiwán, el peligro de cargas sísmicas puede determinar con frecuencia el diseño de la turbina eólica, ya que las cargas sísmicas pueden ser significativamente más altas que las cargas no sísmicas para la torre y para la estructura de soporte de la turbina eólica. En consecuencia, satisfacer los requisitos sísmicos puede requerir un aumento en los costes de la torre y de la estructura de soporte, lo que puede provocar la inviabilidad económica de un proyecto de turbinas eólicas. Además, las elevadas cargas sísmicas que se producen en las palas u otros componentes de la góndola (RNA) pueden hacer que un posible lugar o tipo de turbina sean técnicamente inviables para localizaciones en alta mar en esta región.

40 Cuando se produce un terremoto, la estructura de soporte de la turbina eólica está sometida a aceleraciones sísmicas que se transfieren a través del lecho rocoso y las capas de suelo (del terreno) a la estructura de soporte. Uno de los mayores problemas de las cargas sísmicas elevadas puede producirse cuando el contenido de frecuencia de estas aceleraciones sísmicas coincide con una de las frecuencias estructurales de la turbina eólica y de la estructura de soporte. Esta “resonancia” puede provocar vibraciones importantes y, por lo tanto, cargas críticas en uno o más de los componentes estructurales de la turbina (por ejemplo, puede romperse una pala).

50 Para reducir la carga sísmica en una turbina eólica, el enfoque convencional consiste en alterar el diseño de la estructura de soporte de la turbina eólica, para evitar frecuencias sísmicas que pueden excitar modos estructurales de la turbina.

Sin embargo, este enfoque puede tener muchos inconvenientes, ya que produce elevados costes adicionales. Además, no puede utilizarse en caso de que las frecuencias sísmicas exciten los modos estructurales de la RNA, ya que el rediseño de la RNA generalmente no es posible para cálculos de carga específicos de lugar.

55 US 2011/0293418 A1 describe un dispositivo y un método para controlar una turbina eólica, en particular, una secuencia de apagado.

DE 10 2018 132 413 A1 describe un método para determinar diferentes vibraciones de una planta de energía eólica.

60 WO 2010/083835 A2 describe una turbina eólica con un sistema de aviso.

EP 2 589 800 A1 describe un dispositivo de control de paso de un molino de viento.

65 Es posible que exista la necesidad de una turbina eólica que pueda funcionar de forma robusta y estable incluso durante un evento sísmico.

Resumen de la invención

Esta necesidad puede ser satisfecha por el objeto según las reivindicaciones independientes. Las realizaciones ventajosas de la presente invención se describen en las reivindicaciones dependientes.

- 5 Según un primer aspecto de la invención, se proporciona una turbina eólica, que comprende:
- i) una torre;
 - 10 ii) un rotor eólico, que está dispuesto en una parte superior de la torre y que comprende al menos una pala, en particular, tres palas, en donde la al menos una pala está dispuesta en una primera posición de paso de pala (posición de pala normal), en particular, en un primer ángulo de paso de pala; y
 - 15 iii) un dispositivo de control de eventos sísmicos, configurado para accionar (como una respuesta al evento sísmico) la al menos una pala de la primera posición de paso de pala a una segunda posición de paso de pala (posición de pala de carga sísmica mitigada), en particular, en un segundo ángulo de paso de pala, que es distinto de la primera posición de paso de pala, para reducir de este modo una carga sísmica que actúa sobre la turbina eólica.

20 De este modo, a) una primera frecuencia de resonancia de borde de pala de la primera posición de paso de pala es más cercana a una frecuencia de resonancia de evento sísmico dominante que una segunda frecuencia de resonancia de borde de pala de la segunda posición de paso de pala y/o b) la primera posición de paso de pala es una posición de no producción de energía, y la segunda posición de paso de pala es una posición de producción de energía.

25 Según un segundo aspecto de la invención, se proporciona un método para reducir una carga sísmica que actúa sobre una turbina eólica durante un evento que causa una carga sísmica, en particular un terremoto, en donde la turbina eólica comprende una torre y un rotor eólico, dispuesto en una parte superior de la torre y que comprende al menos una pala, en donde la al menos una pala se dispone en una primera posición de paso de pala. El método comprende:

- 30 i) obtener una información indicativa de un evento que provoca una carga sísmica, por ejemplo, una alerta de terremoto; y, en particular, con posterioridad,
- ii) accionar la al menos una pala de la primera posición de paso de pala a una segunda posición de paso de pala, que es distinta de la primera posición de paso de pala.

35 De este modo, a) una primera frecuencia de resonancia de borde de pala de la primera posición de paso de pala es más cercana a una frecuencia de resonancia de evento sísmico dominante que una segunda frecuencia de resonancia de borde de pala de la segunda posición de paso de pala y/o b) la primera posición de paso de pala es una posición de no producción de energía, y la segunda posición de paso de pala es una posición de producción de energía.

40 Según un ejemplo para entender mejor la invención, se describe un uso (método de uso) de un accionamiento de paso de pala de turbina eólica para reducir la carga sísmica que actúa sobre la turbina eólica. En particular, para evitar una resonancia (coincidencia, amplificación) de una frecuencia de resonancia de evento sísmico dominante y una frecuencia de resonancia de borde de pala.

- 45 Según un ejemplo para entender mejor la invención, se proporciona una turbina eólica que comprende:
- i) una torre;
 - 50 ii) y un rotor eólico, que está dispuesto en una parte superior de la torre y que comprende al menos una pala, en particular, tres palas; y
 - iii) un dispositivo de control, configurado para
- 55 mantener la al menos una pala en una posición de paso de pala de producción de energía durante un evento sísmico, para reducir de este modo la carga sísmica que actúa sobre la turbina eólica.

60 En el contexto del presente documento, el término “posición de paso de pala” puede referirse en particular a un “ángulo de paso de pala”. La definición de un ángulo de paso de pala es bien conocida en el campo de las turbinas eólicas como el ángulo entre la línea de cuerda de la pala y el plano de rotación de la pala (línea de referencia en el cubo del rotor). En otras palabras, el ángulo de paso de pala es el ángulo en que se dispone una pala de turbina con respecto al plano de rotación, es decir, el ángulo que se mide entre el plano de rotación y una línea recta (línea de cuerda) desde un borde de la pala al otro. Esta línea de cuerda es una línea recta imaginaria que une el borde delantero y el borde trasero de la pala (véanse también las Figuras 3 y 4 como ilustración). El accionamiento de paso puede ser, por ejemplo, un accionamiento de paso hidráulico o eléctrico.

65

En el contexto del presente documento, el término “evento sísmico” puede referirse en particular a un evento que está asociado con un movimiento del terreno, por ejemplo, un terremoto. Cuando el evento sísmico es de una intensidad específica, puede sacudir la turbina eólica y provocar una carga sísmica que provoque daños y un mal funcionamiento de la turbina eólica.

5 En el contexto del presente documento, el término “dispositivo de control de eventos sísmicos” puede referirse en particular a cualquier dispositivo que esté configurado para tener en cuenta información asociada/indicativa con respecto a un evento sísmico, al realizar una operación de control y/o una operación de regulación. Un dispositivo de control de eventos sísmicos puede ser un procesador o una pluralidad de procesadores. Además, un dispositivo de control de eventos sísmicos puede ser un sistema de control de una turbina eólica o un software incorporado a un sistema de control de turbina eólica. En un ejemplo específico, no se añade ningún hardware a una turbina eólica existente y se incorpora un software de control de eventos sísmicos en el dispositivo de control de turbina eólica (controlador), que se convierte entonces (al menos parcialmente) en un dispositivo de control de eventos sísmicos. Un dispositivo de control de eventos sísmicos puede incluir un dispositivo de ajuste de paso de pala o puede estar acoplado a un dispositivo de ajuste de paso de pala. En este último caso, el dispositivo de ajuste de paso de pala puede controlar y/o regular el dispositivo de ajuste de paso de pala, en particular, para reducir la carga sísmica que actúa sobre la turbina eólica. El dispositivo de control de eventos sísmicos puede detectar por sí mismo información indicativa de eventos sísmicos (p. ej., utilizando un detector) o puede recibir información indicativa de eventos sísmicos de otro dispositivo (externo).

20 El dispositivo de control de eventos sísmicos puede accionar directamente las palas (p. ej., cuando el dispositivo de ajuste de posición de paso de pala forma parte del dispositivo de control de eventos sísmicos) o activar un accionamiento mediante el dispositivo de ajuste de posición de paso de pala. En este documento, ambas opciones están cubiertas por el término “accionar”. Además, el dispositivo de control sísmico puede ajustar preventivamente las posiciones de paso de pala.

25 En el contexto del presente documento, la expresión “información indicativa de un evento sísmico” o “información indicativa de un evento sísmico que provoca una carga” puede incluir cualquier información relacionada con un evento sísmico actual o potencial. En un ejemplo básico, la información indicativa puede ser que la turbina eólica está instalada en una región con un mayor riesgo de eventos sísmicos. En otro ejemplo, la información puede ser una alerta sísmica, por ejemplo, de que el terreno comienza a moverse. En un ejemplo más avanzado, la información puede incluir información específica sobre las propiedades del terreno y cómo accionar los ángulos de paso de pala en consecuencia.

30 Según una realización ilustrativa, la invención puede basarse en la idea de que una turbina eólica puede funcionar de forma robusta y estable, incluso durante un evento sísmico (que provoca una carga), si el ángulo o ángulos de paso de pala se accionan de una forma específica para reducir la carga sísmica.

35 Los enfoques convencionales para reducir las cargas sísmicas que actúan sobre una turbina eólica se limitan en principio a diseños estructurales (p. ej., una estructura de soporte más robusta), siendo, sin embargo, costosos y subóptimos en algunos aspectos (p. ej., el rediseño sísmico de forma típica requiere estructuras más pesadas).

40 En la actualidad, los inventores han observado que las cargas sísmicas más altas pueden producirse en la estructura de la turbina eólica, cuando las posiciones de paso de pala están en un régimen de no producción de energía, por ejemplo, cuando se ven forzadas a permanecer en la posición de bandera, tal como sucedería al final de una parada de la turbina (y/o con velocidades de viento extremas). Basándose en esta observación, los inventores descubrieron además que puede lograrse una reducción sorprendentemente eficiente y robusta de la carga sísmica en una turbina eólica cuando las posiciones de paso de pala se optimizan de modo que las cargas sísmicas críticas se reducen en la mayor medida posible (por ejemplo, ajustándolas a un régimen de producción de energía).

45 La consecuencia directa de las posiciones de paso de pala optimizadas puede ser una reducción de las cargas sísmicas en la turbina eólica y en su estructura de soporte. De este modo, la posición o posiciones de paso de pala pueden ajustarse (de forma colectiva o individual) para alterar la frecuencia estructural de la turbina eólica y/u otras propiedades aeroelásticas para reducir las cargas sísmicas. Además, un cambio en la posición de paso de pala también puede alterar las fuerzas aerodinámicas y/o las fuerzas de rotación en la turbina eólica, lo que puede reducir adicionalmente la carga experimentada por la turbina eólica durante un evento sísmico. En un ejemplo, el cambio de paso de las palas evita la resonancia de una frecuencia de terreno (terremoto) (frecuencia/frecuencias de resonancia de un evento sísmico dominante y/o frecuencia/frecuencias de amplificación de capa de suelo/terreno) y una frecuencia de pala (frecuencia/frecuencias de resonancia de borde de pala).

Realizaciones ilustrativas

60 Según una realización, una frecuencia de pala está más cerca de una frecuencia de terreno de evento sísmico en la primera posición de paso de pala que en la segunda posición de paso de pala. En otras palabras, una primera frecuencia de resonancia de borde de pala de la primera posición de paso de pala es más cercana a una frecuencia de resonancia de evento sísmico dominante que una segunda frecuencia de resonancia de borde de pala del segundo paso de pala. Por lo tanto, una frecuencia de resonancia de borde de pala es más cercana (es más similar) a una frecuencia de resonancia de evento sísmico dominante (en otras palabras, frecuencia de amplificación de capa de suelo/terreno) en la primera posición de paso de pala que en la segunda posición de paso de pala. De este modo, una primera frecuencia de

resonancia de borde de pala que se produce en la primera posición de paso de pala puede ser más cercana a dicha frecuencia de resonancia de evento sísmico dominante (frecuencia de amplificación de capa de suelo) que una segunda frecuencia de resonancia de borde de pala que se produce en la segunda posición de paso de pala. Los inventores han descubierto que, de esta forma puede reducirse eficientemente una resonancia (coincidencia, amplificación) de la frecuencia de pala (resonancia) y de la frecuencia de amplificación de terreno (terremoto).

Según otra realización, la primera posición de paso de pala es una posición (régimen) de no producción de energía, en particular, una del grupo que consiste en: la posición de bandera, la posición de reposo, la posición de parada de la turbina, una posición de viento extremo. Los inventores han descubierto que la carga sísmica que actúa sobre una turbina eólica puede reducirse significativamente cuando el ángulo de paso de pala no está en el régimen de no producción de energía durante un evento sísmico.

El término “no producción de energía” puede referirse a un estado de funcionamiento de la turbina eólica en donde (esencialmente) no se produce energía eléctrica. En este estado, el ángulo de paso de pala es generalmente superior a 50°, en particular, alrededor de 90°. Normalmente se entra en un régimen de no producción de energía cuando la turbina eólica está en un estado inactivo, en la posición de bandera o en condiciones de viento extremo, cuando la carga sobre la turbina eólica es demasiado fuerte para la producción de energía.

Según una realización adicional, la segunda posición de paso de pala es una posición (régimen) de producción de energía. A su vez, los inventores han descubierto que la carga sísmica que actúa sobre una turbina eólica puede reducirse significativamente cuando el ángulo de paso de pala está en el régimen de producción de energía durante un evento sísmico.

El término “producción de energía” puede referirse a un estado de funcionamiento de la turbina eólica en donde se produce energía eléctrica. Esto puede hacerse con velocidades de viento bajas y altas, pero no a velocidades de viento extremas. Para obtener tanta energía eólica como sea posible, el ángulo de paso de pala es generalmente inferior a 50° en este régimen, en particular, 30° o inferior.

Una consecuencia del objeto descrito anteriormente puede ser que las posiciones de paso de pala de las turbinas eólicas en regiones de alta actividad sísmica pueden estar (esencialmente) siempre en la posición de producción de energía para estar preparadas para un potencial evento sísmico.

Según otra realización específica, la primera posición de la pala puede ser una posición (régimen) de producción de energía. Según otra realización específica, la segunda posición de la pala puede ser una posición (régimen) de no producción de energía.

Según otra realización, la primera posición de paso de pala está definida por un primer ángulo de paso de pala, en donde la segunda posición de paso de pala está definida por un segundo ángulo de paso de pala, y en donde accionar el ángulo de paso de pala de la al menos una pala comprende girar la al menos una pala alrededor de un eje que está alineado sustancialmente en paralelo a la extensión longitudinal de la al menos una pala. Utilizando los ángulos de paso de pala, la posición de paso de pala puede ajustarse de forma muy precisa.

Según una realización adicional, el primer ángulo de paso de pala es superior a 50°. Según una realización adicional, el segundo ángulo de paso de pala es inferior a 50°.

Según una realización adicional, el segundo ángulo de paso de pala es 30° o inferior, en particular 20° o inferior.

Como se ha descrito anteriormente, el régimen por encima de 50° puede considerarse como un régimen de no producción de energía que puede ser inadecuado para eventos sísmicos, mientras que el régimen por debajo de 50°, en particular, por debajo de 30° o 20°, puede considerarse un régimen de producción de energía en el que puede resultar adecuado entrar durante eventos sísmicos.

En un ejemplo, se ha observado que, cuando el ángulo de paso de pala está cerca del ángulo de paso en reposo pasivo convencional, es decir, en el intervalo de 60° a 89°, la carga sísmica en la parte superior de la torre puede ser extremadamente alta, pudiéndose reducir convencionalmente solo mediante diseños costosos de la torre y la estructura de soporte o mediante estructuras de góndola inviables. Sin embargo, si el ángulo de paso de pala se reduce a alrededor de 20°, pueden conseguirse reducciones de carga de más de 50 % (véase también la Figura 2). Esta reducción de carga permite conseguir importantes reducciones de costes cuando se diseña la turbina eólica y/o la estructura de soporte. Además, la reducción eficiente de las cargas sísmicas puede hacer factibles proyectos que antes eran inviables en regiones de alta actividad sísmica.

Según una realización adicional, la posición de la segunda pala está predeterminada (un punto de ajuste predeterminado). Según una realización adicional, la posición de la segunda pala se establece dinámicamente (un punto de ajuste calculado dinámicamente). Dependiendo de las condiciones actuales, es posible seleccionar por lo tanto un enfoque ventajoso.

Según una realización adicional, la turbina eólica comprende dos o más palas, en particular, exactamente tres, y el dispositivo de control de eventos sísmicos está configurado para accionar (activar el accionamiento de) los ángulos de paso de pala

respectivos de las dos o más palas de forma colectiva o individual. Dependiendo de las condiciones respectivas, puede resultar más ventajoso controlar/regular todas las palas de forma colectiva o cada pala de forma individual.

5 Según una realización adicional, el dispositivo de control de eventos sísmicos está configurado para obtener una información indicativa de un evento sísmico, en particular, antes de accionar la al menos una pala. De este modo, el dispositivo de control de eventos sísmicos puede reaccionar de forma eficiente ante un potencial evento sísmico.

10 Según una realización adicional, la turbina eólica comprende además un detector de eventos sísmicos para detectar la información indicativa de un evento sísmico.

Según una realización adicional, la turbina eólica está configurada para obtener la información indicativa de un evento sísmico a partir de un detector de eventos sísmicos externo.

15 Según una realización adicional, la turbina eólica comprende además un suministro de energía de reserva. Esto puede permitir obtener la ventaja de que la turbina eólica pueda funcionar de una forma especialmente segura y robusta.

20 Si la turbina eólica pierde el acceso a la red durante un evento sísmico, es posible que ya no pueda accionar la posición de paso de pala. En tal caso, puede resultar muy ventajoso aplicar un suministro de energía auxiliar o de reserva para permitir el funcionamiento correcto del accionamiento del ángulo de paso de pala.

Según una realización adicional, el accionamiento (respuesta a la carga sísmica) incluye un accionamiento de posición de paso de pala calculada dinámicamente o un accionamiento de posición de paso de pala predeterminada. Dependiendo de las condiciones actuales, es posible seleccionar por lo tanto un enfoque ventajoso.

25 En una realización ilustrativa, se asume un conocimiento adecuado sobre la energía espectral esperada del evento sísmico en el lecho rocoso y la línea de lodo (terreno). Además, también se asume un buen conocimiento sobre las frecuencias estructurales de la turbina y su variación con el ángulo o ángulos de paso de pala. Basándose en la información disponible, pueden determinarse las posiciones de paso de pala (p. ej., mediante simulaciones de turbinas aeroelásticas) que minimizan las cargas estructurales de la turbina cuando la turbina está sujeta a un evento sísmico.
30 Esto puede hacerse a nivel de posición específica o genérico. Estas posiciones de paso de pala pueden utilizarse como posiciones de paso por defecto. Si se utiliza un sistema de detección de terremotos basado en una comunicación externa, sensores sísmicos dedicados en la estructura de la turbina o en el sitio de la turbina, o se utilizan señales estándar de turbina, tal sistema de detección puede activar directamente la entrada de la turbina en las posiciones de paso de pala definidas anteriormente. Estas posiciones de paso de pala también pueden utilizarse como las posiciones de paso seguras en las que entra la turbina cuando se producen eventos severos o críticos (según determine el controlador de la turbina [dispositivo de control de eventos sísmicos]), para garantizar que la turbina eólica entre en un estado en donde sea menos susceptible a cargas inducidas por seísmos. Las posiciones de paso de pala pueden ser las mismas para las tres palas, o pueden ser distintas para cada pala individual, por ejemplo, para distribuir las frecuencias de resonancia dentro y fuera de plano y de este modo reducir los efectos de resonancia.

40 Según otra realización, el dispositivo de control de eventos sísmicos está configurado además para i) obtener información indicativa de las propiedades del terreno, ii) correlacionar la información indicativa de las propiedades del terreno con posiciones de paso de pala respectivas, en particular basándose en los datos de funcionamiento, y iii) aplicar la información de la correlación para (proporcionar) el accionamiento. Esto puede ofrecer la ventaja de que la información indicativa de eventos sísmicos pueda determinarse activamente y correlacionarse con posiciones de paso de pala ventajosas, de modo que, en un evento sísmico, las posiciones de paso de pala preferidas estén disponibles directamente.

50 En una realización ilustrativa, un conocimiento perfecto de las propiedades del terreno (suelo y lecho rocoso) es generalmente difícil de lograr a priori, pero puede no ser necesario en este ejemplo. Sin embargo, es posible que se requiera un conocimiento adecuado sobre la energía espectral esperada del evento sísmico. Además, se asume un conocimiento sobre las frecuencias estructurales de la turbina y su variación con el ángulo de paso de pala. Tras la instalación, el controlador de la turbina eólica (que incluye el dispositivo de control de eventos sísmicos) puede recopilar más información sobre las propiedades del terreno basándose en datos de funcionamiento (tal como la primera frecuencia de la estructura de soporte). El controlador de la turbina puede realizar experimentos dedicados para determinar otras propiedades del terreno. Basándose en las propiedades del terreno determinadas in situ, las posiciones de paso de pala pueden definirse como las posiciones de paso por defecto para velocidades de viento reducidas, o como posiciones de paso de pala seguras en caso de condiciones de fallo, o en el caso de un sistema de detección de terremotos (como se describe en el ejemplo anterior). Las propiedades del terreno pueden cambiar durante un período de tiempo, en cuyo caso el controlador de la turbina puede rastrear continuamente dichas propiedades y actualizar las posiciones de paso de pala en consecuencia. Es posible generar una tabla de consulta para su uso por el controlador de la turbina, en principio (p. ej., mediante simulaciones aeroelásticas de turbina) para correlacionar las propiedades del terreno medidas con las posiciones de paso de pala óptimas que minimizan las cargas sísmicas de la turbina. Un ejemplo de tal tabla de consulta puede incluir una frecuencia propia de turbina específica [Hz] y las posiciones de paso de pala correspondientes para cada pala.

65 Según una realización adicional, el dispositivo de control de eventos sísmicos está configurado además para i) obtener información de retroalimentación, en particular, una señal proxy, de una carga de turbina, y ii) aplicar la

información de retroalimentación para (obtener/activar) el accionamiento. Esto puede permitir obtener la ventaja de que, aunque pueda no existir mucha información indicativa de eventos sísmicos disponible, se permite un accionamiento eficiente que tiene en cuenta la carga o cargas actuales de la turbina.

5 En una realización ilustrativa, se asume que, esencialmente, no se conocen las propiedades del terreno (terreno y lecho rocoso), la energía espectral sísmica o las propiedades estructurales de la turbina. Es posible que se requiera un sistema de detección de terremotos, basado en comunicación externa, sensores sísmicos dedicados o señales de turbina estándar. Además, puede utilizarse una señal que pueda servir como un proxy (preferiblemente lineal) para cargas de turbina críticas. Este ejemplo específico puede basarse en un control de paso activo del dispositivo de control de eventos sísmicos que se activa una vez que se recibe una señal de activación del sistema de detección de terremotos. El controlador activo, una vez habilitado, puede utilizar la retroalimentación de la señal de carga de la turbina (proxy) y controlar la posición de paso de las palas de modo que se minimicen las cargas sísmicas. La acción de control puede basarse en una función de transferencia lineal o no lineal estática o dinámica entre las señales de carga de retroalimentación (multivariables) y el accionador de posición de paso. El controlador activo puede controlar la misma posición para las tres palas de forma activa, o puede realizar un control de paso individual para reducir las cargas sísmicas.

Según una realización adicional, el método comprende además mantener, en particular, durante un período de tiempo prolongado, más en particular, durante un período de tiempo de no producción de energía, la al menos una pala en la segunda posición de pala para anticipar eventos sísmicos futuros, en particular, repentinos/imprevistos/indetectables. Esto puede permitir obtener la ventaja de que se reduzca la carga sísmica que actúa sobre la turbina eólica, incluso aunque un evento sísmico pueda producirse de forma repentina sin que haya tiempo para adaptar posteriormente la posición de paso de pala.

Normalmente, la posición de paso de pala se acciona hasta la primera posición de paso de pala como una posición “segura” en caso de no producción de energía, fallos de red, fallos internos, mantenimiento o estado con poco viento (en otras palabras: en una parada de la turbina eólica). Sin embargo, para reducir eficazmente la carga sísmica en caso de un evento sísmico repentino, la posición de paso de pala se mantiene (en particular, la mayor parte del tiempo, o esencialmente siempre) en la segunda posición de paso de pala.

Según una realización adicional, se proporciona un método para reducir una carga sísmica que actúa sobre una turbina eólica durante un evento que provoca una carga sísmica, en particular un terremoto, en donde la turbina eólica comprende una torre y un rotor eólico, dispuesto en una parte superior de la torre y que comprende al menos una pala. El método comprende mantener la al menos una pala en la segunda posición de pala para anticipar eventos sísmicos futuros, en donde una frecuencia de pala es más cercana (más similar) a una frecuencia de terreno de evento sísmico en una primera posición de paso de pala, que es distinta de la segunda posición de pala, que en la segunda posición de paso de pala.

Los aspectos definidos anteriormente y otros aspectos de la presente invención se infieren de los ejemplos de realización que se describirán a continuación y se explican con referencia a los ejemplos de realización. El alcance de la invención se define por las reivindicaciones adjuntas.

40 **Breve descripción de los dibujos**

La Figura 1 muestra una turbina eólica según una realización ilustrativa de la presente invención.

45 La Figura 2 muestra un diagrama para ilustrar el método para reducir la carga sísmica que actúa sobre una turbina eólica según una realización ilustrativa de la invención.

Las Figuras 3 y 4 ilustran la definición común del ángulo de paso de pala.

50 **Descripción detallada**

La ilustración en los dibujos está en forma esquemática. Se observa que en diferentes figuras, los elementos similares o idénticos se proporcionan con los mismos números de referencia o con números de referencia que difieren solo en el primer dígito. Para evitar repeticiones innecesarias o características que ya se han aclarado con respecto a una realización descrita anteriormente, no se aclaran nuevamente en una posición posterior de la descripción.

Además, los términos espacialmente relativos, tales como “frontal” y “posterior”, “encima” y “debajo”, “izquierda” y “derecha”, etc. se usan para describir la relación de un elemento con otros elementos como se ilustra en las figuras. Por lo tanto, los términos espacialmente relativos pueden aplicarse a orientaciones en uso que difieren de la orientación representada en las figuras. Obviamente, todos estos términos espacialmente relativos se refieren a la orientación mostrada en las Figuras solo para facilitar la descripción y no son necesariamente limitativos, ya que un aparato según una realización de la invención puede adoptar orientaciones distintas a las ilustradas en las Figuras cuando se utilizan.

Según una realización ilustrativa, debe tenerse en cuenta el siguiente aspecto: cuando una turbina eólica queda sujeta a un evento sísmico, puede enfrentarse a cargas de turbina máximas cuando el espectro de aceleración sísmica excita las frecuencias propias estructurales de la turbina. Las frecuencias propias de varios modos estructurales de las turbinas eólicas,

incluyendo el primer modo de pala, dependen directamente de la posición de paso de la pala. Sin embargo, la posición de paso de pala por debajo de la velocidad de arranque del viento, por encima de la velocidad de corte del viento, y en el régimen de funcionamiento, se diseña habitualmente solo para tener en cuenta la producción máxima de energía y las cargas óptimas no sísmicas de las turbinas. Esta posición de paso de pala puede no ser óptima cuando la turbina se somete a cargas sísmicas. Como ejemplo específico, con bajas velocidades del viento, cuando se experimentan cargas sísmicas máximas, las palas pueden estar en posición de bandera, lo que puede provocar cargas sísmicas inaceptablemente altas.

La **Figura 1** muestra una turbina eólica 100 según una realización de la invención. La turbina eólica 100 comprende una torre 120 que está montada sobre un terreno (con una estructura de soporte no representada) en una región en donde pueden producirse eventos sísmicos, tales como terremotos. La turbina eólica 100 puede estar situada en tierra o en alta mar.

En la parte superior de la torre 120 está dispuesta una góndola 122. Entre la torre 120 y la góndola 122 se proporciona una parte 121 de ajuste de ángulo de guiñada, que es capaz de girar la góndola 122 alrededor de un eje vertical no representado, que está alineado con la extensión longitudinal de la torre 120. Controlando de forma apropiada la parte 121 de ajuste del ángulo de guiñada, puede garantizarse que, durante el funcionamiento normal de la turbina eólica 100, la góndola 122 esté siempre alineada de forma adecuada con la dirección actual del viento.

La turbina eólica 100 comprende, además, un rotor eólico 110 que tiene tres palas 114. En la perspectiva de la Figura 1 solo son visibles dos palas 114. El rotor 110 puede girar alrededor de un eje 110a de rotación. Las palas 114, que están montadas en un cubo 112, se extienden radialmente con respecto al eje 110a de rotación y giran dentro del plano RP de rotación.

Entre el cubo 112 y una pala 114 se proporciona, respectivamente, un dispositivo 116 de ajuste de ángulo de paso de pala, para ajustar el ángulo de paso de pala de cada pala 114 haciendo girar la pala 114 respectiva alrededor de un eje alineado sustancialmente en paralelo a la extensión longitudinal de la pala 114 respectiva. Al controlar el dispositivo 116 de ajuste de ángulo de paso de pala, el ángulo de paso de pala de la pala 114 respectiva puede ajustarse de modo que, al menos cuando el viento no sea demasiado fuerte, pueda recuperarse la energía eólica máxima de la energía mecánica disponible del viento que acciona el rotor eólico 110.

Como puede observarse en la Figura 1, dentro de la góndola 122 se proporciona una caja 124 de engranajes. La caja 124 de engranajes se utiliza para convertir el número de revoluciones del rotor 110 en un mayor número de revoluciones de un eje 125, que se acopla de manera conocida a un transductor electromecánico 140. El transductor electromecánico es un generador 140. En este punto, se indica que la caja 124 de engranajes es opcional, y que el generador 140 también puede acoplarse directamente al rotor 110 mediante el eje 125, sin cambiar el número de revoluciones. En este caso, la turbina eólica es una turbina eólica denominada de accionamiento directo (DD).

Además, se proporciona un freno 126 para detener de forma segura el funcionamiento de la turbina eólica 100 o el rotor 110, por ejemplo, en caso de emergencia.

La turbina eólica 100 comprende además un sistema de control para hacer funcionar la turbina eólica 100 de una forma muy eficiente. Además de controlar, por ejemplo, el dispositivo 121 de ajuste de ángulo de guiñada, el sistema de control representado también se utiliza para ajustar el ángulo de paso de pala de las palas 114 del rotor utilizando los accionadores 116 de forma optimizada.

El sistema de control incluye un dispositivo 153 de control de eventos sísmicos, configurado para accionar las palas 114, respectivamente, de una primera posición de paso de pala a una segunda posición de paso de pala, que es distinta de la primera posición de paso de pala, para reducir una carga sísmica que actúa sobre la turbina eólica 100. En el ejemplo mostrado, el dispositivo 153 de control de eventos sísmicos controla/regula los dispositivos 116 de ajuste de ángulo de paso de pala.

El dispositivo 153 de control de eventos sísmicos obtiene además información indicativa de un evento sísmico. Dicha información puede ser determinada por el propio dispositivo 153 de control de eventos sísmicos o, como se muestra en la Figura 1, puede obtenerse de un dispositivo 160 de detección de eventos sísmicos externo.

La Figura 2 muestra un diagrama para ilustrar el método para reducir una carga sísmica que actúa sobre una turbina eólica utilizando un accionamiento de ángulo de paso de pala. El diagrama muestra una variación del momento de flexión de la parte superior de la torre en función de la posición de paso de pala (colectiva). En particular, se ha realizado una simulación para una turbina eólica en alta mar. La Figura 2 muestra a lo largo del eje x el ángulo de paso de pala [en °] y a lo largo del eje y la carga sísmica en la parte superior de la torre [en unidades arbitrarias (a.U.)]. Puede observarse una reducción en la carga sísmica en la parte superior de la torre (momento de flexión) como consecuencia del establecimiento de un accionamiento del ángulo de paso de pala. En particular, puede observarse que la carga sísmica es muy alta en el régimen de no producción de energía y en la posición de bandera (aproximadamente 90°). Además, en el ángulo de paso en reposo (el intervalo entre 60° y 86°), la carga sísmica es comparativamente alta. En cambio, el ángulo de paso de pala del régimen de producción de energía, por ejemplo, por debajo de 30°, en particular, por debajo de 20°, provoca una carga sísmica comparativamente baja en la torre.

Las Figuras 3 y 4 ilustran la definición común del ángulo de paso de pala, que es el ángulo entre la línea CL de cuerda de la pala 114 con respecto al plano RP de rotación de la pala 114. La línea CL de cuerda es, por lo tanto, una línea imaginaria desde el borde delantero hasta el borde trasero de la pala 114.

- 5 El alcance de la invención se define por las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Una turbina eólica (100), que comprende:
 - 5 una torre (120);
un rotor eólico (110), que está dispuesto en una parte superior de la torre (120) y que comprende al menos una pala (114), en donde la al menos una pala (114) está dispuesta en una primera posición de paso de pala; y
 - 10 un dispositivo (153) de control de eventos sísmicos, configurado para accionar la al menos una pala (114) de la primera posición de paso de pala a una segunda posición de paso de pala, que es diferente de la primera posición de paso de pala, para reducir una carga sísmica que actúa sobre la turbina eólica (100); en donde una primera frecuencia de resonancia de borde de pala de la primera posición de paso de pala es más cercana a una frecuencia de resonancia de evento sísmico dominante que una segunda frecuencia de resonancia de borde de pala de la segunda posición de paso de pala;
 - 15 y/o
en donde la primera posición de paso de pala es una posición de no producción de energía, y en donde la segunda posición de paso de pala es una posición de producción de energía.
- 20 2. La turbina eólica (100) según la reivindicación 1, en donde la primera posición de paso de pala es la posición de bandera o la posición de reposo.
3. La turbina eólica (100) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores,
 - 25 en donde la primera posición de paso de pala está definida por un primer ángulo de paso de pala, en donde la segunda posición de paso de pala está definida por un segundo ángulo de paso de pala, y
 - en donde accionar el ángulo de paso de pala de la al menos una pala (114) comprende: girar la al menos una pala (114) alrededor de un eje que está alineado sustancialmente en paralelo a la extensión longitudinal de la al menos una pala (114).
 - 30
4. La turbina eólica (100) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la segunda posición de pala está predeterminada.
- 35 5. La turbina eólica (100) según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en donde la segunda posición de pala se establece dinámicamente.
6. La turbina eólica (100) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores,
 - 40 en donde la turbina eólica (100) comprende dos o más, en particular, exactamente tres, palas (114), y
 - en donde el dispositivo (153) de control de eventos sísmicos está configurado para accionar los ángulos de paso de pala respectivos de las dos o más palas (114) de forma colectiva o individual.
- 45 7. La turbina eólica (100) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el dispositivo (153) de control de eventos sísmicos está configurado para obtener una información indicativa de un evento sísmico, en particular, antes de accionar la al menos una pala (114).
- 50 8. La turbina eólica (100) según las reivindicaciones anteriores,
 - en donde la turbina eólica (100) comprende además un detector de eventos sísmicos para detectar la información indicativa de un evento sísmico; y/o
 - 55 en donde la turbina eólica (100) está configurada para obtener la información indicativa de un evento sísmico a partir de un detector de eventos sísmicos externo.
9. La turbina eólica (100) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la turbina eólica (100) comprende además un suministro de energía de reserva.
- 60 10. La turbina eólica (100) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el dispositivo (153) de control de eventos sísmicos también está configurado para
 - 65 obtener información indicativa de las propiedades del terreno, y correlacionar la información indicativa de las propiedades del terreno con respectivas posiciones de paso de pala, en particular, basándose en datos de funcionamiento, y aplicar la información de correlación para el accionamiento.

11. La turbina eólica (100) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el dispositivo (153) de control de eventos sísmicos también está configurado para
- 5 obtener información de retroalimentación, en particular, una señal proxy, de una carga de turbina, y aplicar la información de retroalimentación para el accionamiento.
12. Un método para reducir una carga sísmica que actúa sobre una turbina eólica (100) durante un evento que provoca una carga sísmica, en donde la turbina eólica (100) comprende una torre (120) y un rotor eólico (110), dispuesto en una parte superior de la torre (120) y que comprende al menos una pala (114), en donde la al menos una pala (114) se dispone en una primera posición de paso de pala, comprendiendo el método:
- 10 obtener una información indicativa de un evento que provoca una carga sísmica; y accionar la al menos una pala (114) de la primera posición de paso de pala a una segunda posición de paso de pala, que es distinta de la primera posición de paso de pala, para reducir de este modo la carga sísmica que actúa sobre la turbina eólica (100); en donde una primera frecuencia de resonancia de borde de pala de la primera posición de paso de pala es más cercana a una frecuencia de resonancia de evento sísmico dominante que una segunda frecuencia de resonancia de borde de pala de la segunda posición de paso de pala;
- 15 y/o
- 20 en donde la primera posición de paso de pala es una posición de no producción de energía, y en donde la segunda posición de paso de pala es una posición de producción de energía.
- 25 13. El método según la reivindicación 12, en donde el método comprende: mantener la al menos una pala (114) en la segunda posición de pala para anticipar próximos eventos sísmicos.

Figura 1

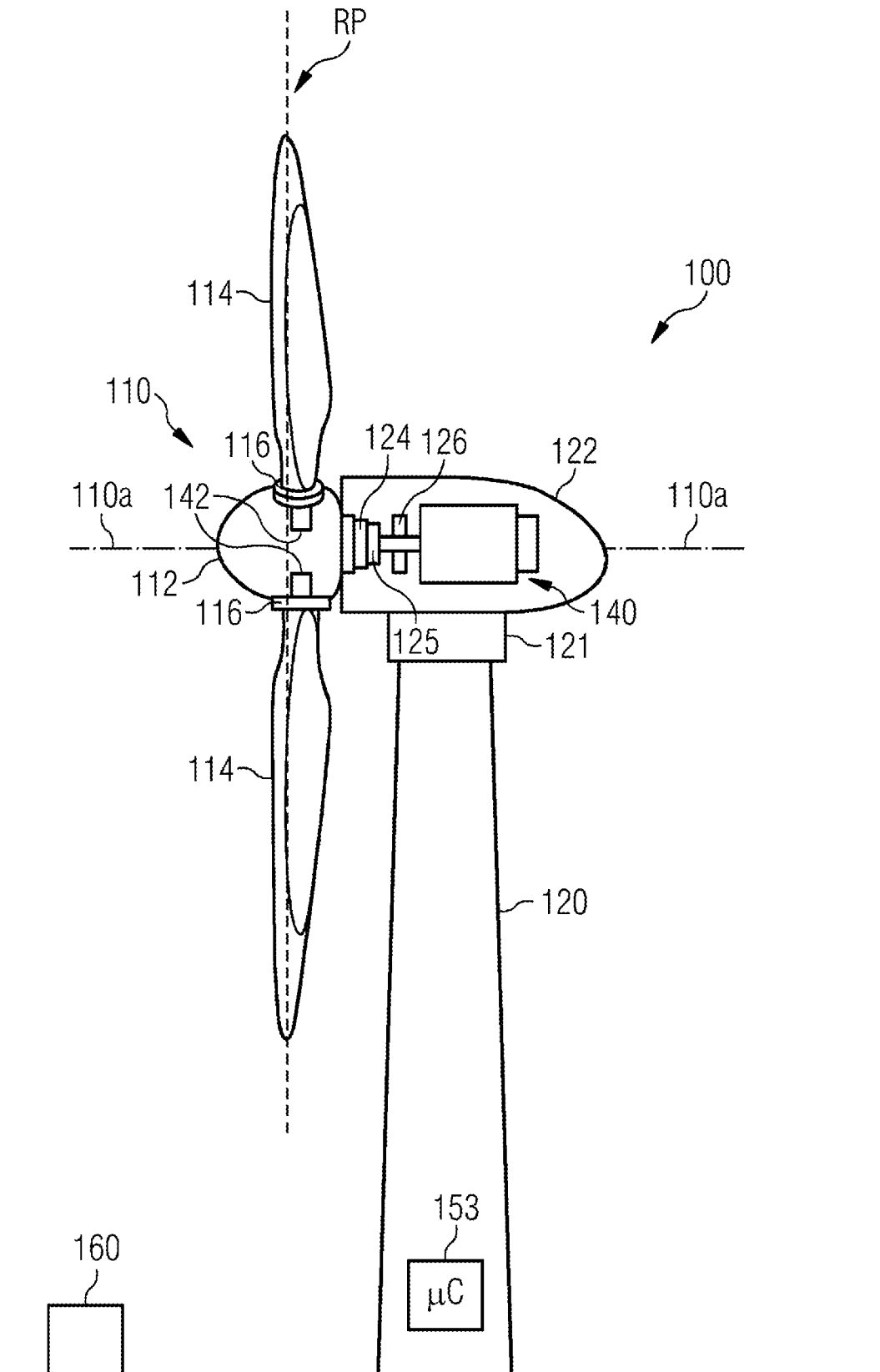


Figura 2

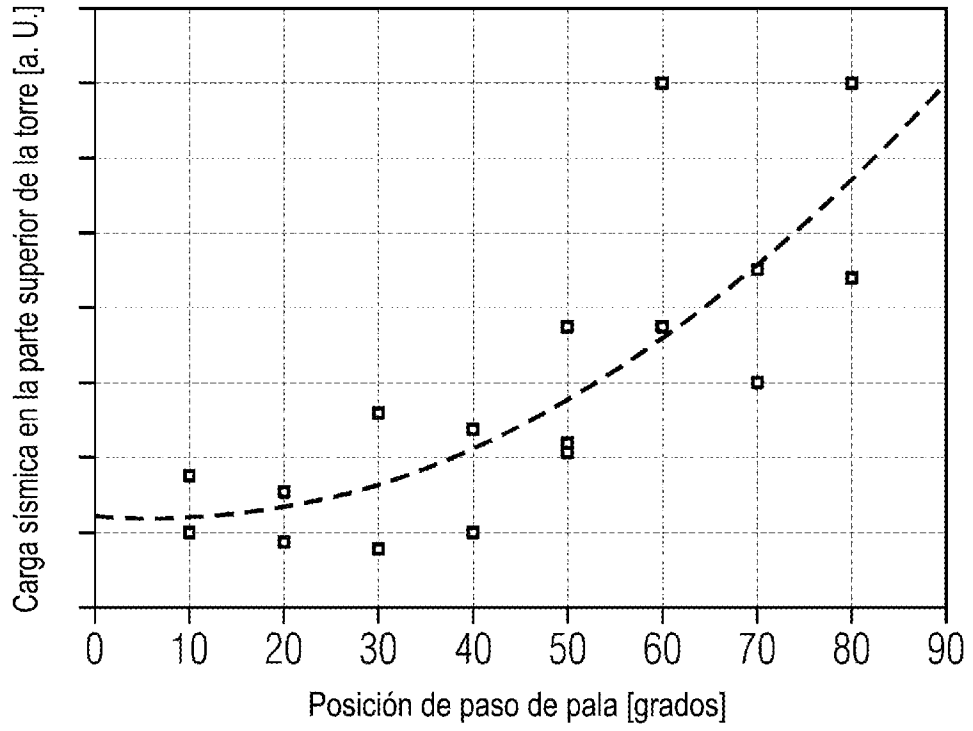


Figura 3

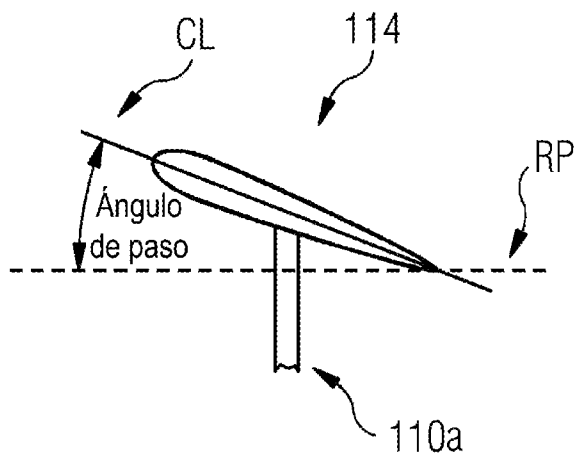


Figura 4

